



УДК 621.313.3

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ВЕКТОРНОЙ ШИМ ДЛЯ МИКРОПРОЦЕССОРОВ TMS320**FEATURES OF IMPLEMENTATION SPACE-VECTOR PWM FOR MICROPROCESSORS TMS320**

Плотников Юрий Валерьевич, канд. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: yu.v.plotnikov@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

Уймин Юрий Сергеевич, магистрант каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: yura20legend@yandex.ru, Тел.: +7(912) 699-88-12

Iurii V. Plotnikov, candidate of technical sciences, associate professor, department of « Electric drive and automation of industrial plants and technological complexes», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: yu.v.plotnikov@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

Iurii S. Uimin, Master student, Department «Electric drive and automation of industrial plants and technological complexes», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: yura20legend@yandex.ru. Ph.: +7(912) 699-88-12

Аннотация: Векторные системы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) является популярными и наиболее подходящими методами ШИМ для трехфазных инверторов напряжения в таких задачах, как управление асинхронными двигателями и синхронными двигателями переменного тока. В этой статье проводится обсуждение теории и особенностей реализации векторной ШИМ. Показана практическая реализация векторной ШИМ на базе микропроцессора TMS320F28335.

Abstract: The space-vector pulse-width modulation (PWM) method is a popular and most suitable PWM method for three-phase voltage inverters in such problems as the control of asynchronous motors and synchronous AC motors. This article discusses the theory and implementation of the technique of space-vector PWM. Also, practical implementation of the space-vector PWM based on the TMS320F28335 microprocessor is shown.

Ключевые слова: Частотно-регулируемый привод, Контроллер TI F28335; ШИМ, пространственно-векторная ШИМ.

Key words: Variable-frequency electric drive, TI F28335 Controller; PWM, Space-Vector PWM.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время активное развитие получают микропроцессорная техника и силовая электроника, для задач точного и качественного управления двигателями большую популярность имеют инверторы, предназначенные для реализации частотного управления. Они позволяют точно управлять как частотой, так и величинами напряжения и тока, приложенными к двигателю. В результате частотно-регулируемые электроприводы обеспечивают лучшую эффективность и более высокую производительность по сравнению нерегулируемыми электроприводами. Для формирования выходного напряжения инвертора используется принцип широтно-импульсной модуляции. Сигналы ШИМ, которые подаются на затворы силовых транзисторов инвертора,

формируют напряжение, которое подается на двигатель.

Существуют разные методы ШИМ. Наиболее популярна синусоидальная ШИМ, но относительно новая векторная ШИМ имеет более благоприятные показатели [1], такие как: лучшее использование напряжения питания постоянного тока, меньшее влияние на питающую сеть. В этой статье будет рассмотрен метод пространственно-векторной ШИМ для трехфазного инвертора. Кроме этого, будут обсуждены моменты модифицированных алгоритмов ШИМ и особенности их микропроцессорной реализации.

ТЕОРИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Методология векторной ШИМ базируется на векторном представлении выходных напряжений

инвертора и ориентирована на микропроцессорную реализацию [2]. Векторная ШИМ генерирует меньше гармонических искажений в выходных напряжениях или токах в обмотках двигателя и обеспечивает более эффективное использование напряжения питания постоянного тока по сравнению с методом координатной ШИМ [1]. Для трехфазных конфигураций инвертора напряжения, упрощенная схема которого показана на Рис. 1, существует восемь возможных комбинаций состояний включения и выключения силовых транзисторов.

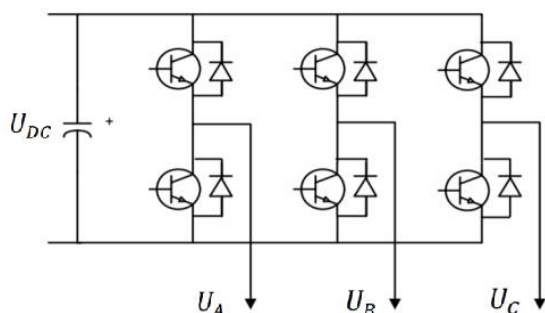


Рис. 1. Электрическая схема инвертора напряжения

Анализируя данную схему, можно сделать выводы о том, что существует только 8 комбинаций включения силовых транзисторов (из них 2 нулевых). Каждую комбинационную можно охарактеризовать определенным образующим вектором, которые образуют в плоскости α, β правильный шестиугольник [3], внешний вид которого изображен на рисунке 2.

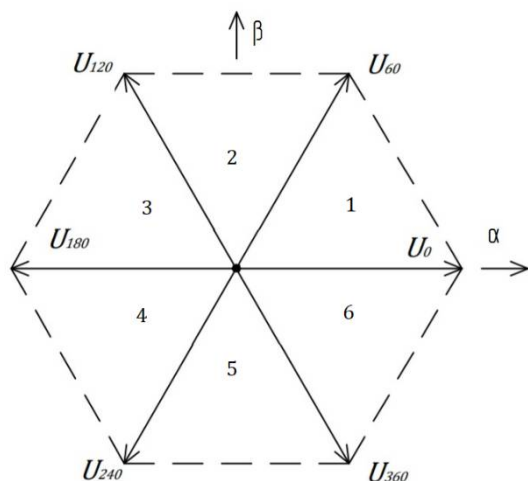


Рис. 2. Образующие векторы, соответствующие каждой комбинации ключей

Поскольку любой сигнал, изменяющийся по синусоидальному закону можно представить, как вращающийся вектор, то мгновенное положение этого вектора можно разложить как сумму

образующих векторов, полученных ранее. Более подробно это показано на Рис. 3.

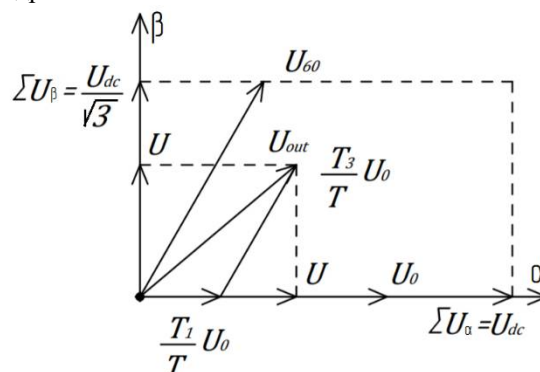


Рис. 3. Проекция заданного вектора напряжения

Здесь заданный вектор U_{out} , он находится в секторе, находящимся между U_0 и U_{60} . Поэтому U_{out} можно выразить через U_0 и U_{60} . Следовательно можно записать:

$$\begin{cases} T = T_1 + T_3 + T_0; \\ U_{out} = \frac{T_1}{T} U_0 + \frac{T_3}{T} U_{60}; \end{cases} \quad (1)$$

где T_1 и T_3 – соответствующие продолжительности действия (включения) напряжений U_0 и U_{60} во время периода T , а T_0 – это продолжительность действия нулевого вектора.

Задача состоит в том, чтобы определить время действия каждого из векторов для определенного заданного значения вектора напряжения.

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ВЕКТОРНОМ АЛГОРИТМЕ ШИМ

Проблемой обычной синусоидальной ШИМ является недоиспользование питающего напряжения. Такую проблему можно решить введением предмодулирующего сигнала. Известно, что при введении предмодуляции можно повысить использованные напряжения постоянного тока примерно на 15,5% [2].

Традиционно эта задача решается такими способами как: введением третьей гармоники, привязкой потенциальной зона нагрузки к потенциальной зоне источника. Важно отметить, что эти методы применимы только к синусоидальной ШИМ. Однако существует другой, более изящный и простой способ, применимый исключительно к векторной ШИМ. Идея метода повышения эффективности использования питающего напряжения для пространственно-векторной ШИМ заключается в следующем. Необходимо определить в каком из 6 секторов находится вектор напряжения для каждого момента времени на протяжении одного периода. Эта задача решается тем, что задается условие работы каждого сектора в зависимости от

знака напряжений U_a , U_b , U_c в трехфазной неподвижной системе координат.

Далее, после разбиения периода на 6 равных секторов. Для каждого сектора отдельно записывается уравнения, соответствующие каждому выходному сигналу. Получается, что выходной сигнал состоит из 6 отдельных независимых частей, описанных разными уравнениями [3]. Более подробно это показано на Рис. 4.

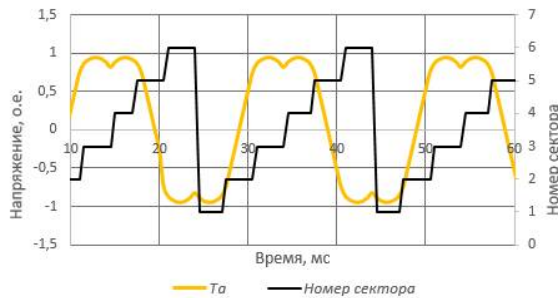


Рис. 4. Соотношение выходного сигнала T_a и секторов

Для определения выходных сигналов напряжений каждой из фаз необходимо рассчитать следующие промежуточные переменные (2), (3) [3]:

$$\begin{cases} U_x = U_\beta; \\ U_y = \frac{U_\beta + \sqrt{3}U_\alpha}{2}; \\ U_z = \frac{U_\beta - \sqrt{3}U_\alpha}{2}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} t_{aon} = \frac{1 - t_1 - t_2}{2}; \\ t_{bon} = t_{aon} + t_1; \\ t_{con} = t_{bon} + t_2; \end{cases} \quad (3)$$

где t_1, t_2 это отношения времени включения векторов, образующих сектор, в котором в данный момент находится вектор, к периоду T из (1). Каждому из которых соответствует свое напряжение U_x , U_y , U_z . Способ расчета промежуточных переменных для каждого сектора приведен в Табл. 1 и 2 [3].

Таблица 1.

Таблица соответствия t_1 , t_2 и U_x , U_y , U_z

Номер сектора	1	2	3	4	5	6
t_1	$-U_z$	U_z	U_x	$-U_x$	$-U_y$	U_y
t_2	U_x	U_y	$-U_y$	U_z	$-U_z$	$-U_x$

Таблица 2.

Способ расчета промежуточных переменных для каждого сектора

Номер сектора	1	2	3	4	5	6
T_a'	t_{aon}	t_{bon}	t_{con}	t_{con}	t_{bon}	t_{aon}

T_b'	t_{bon}	t_{aon}	t_{aon}	t_{bon}	t_{con}	t_{con}
T_c'	t_{con}	t_{con}	t_{bon}	t_{aon}	t_{aon}	t_{bon}

t_{aon} , t_{bon} , t_{con} – это переменные определяющие форму выходного сигнала, характерную определенному отдельному сектору, для каждой фазы.

Так, например, для второго сектора система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} T_b' = \frac{1 - U_z - U_y}{2}; \\ T_a' = T_b + U_x; \\ T_c' = T_a + U_y; \end{cases} \quad (4)$$

Графическая интерпретация выражений (2)-(4) более подробно представлена на Рис. 5.

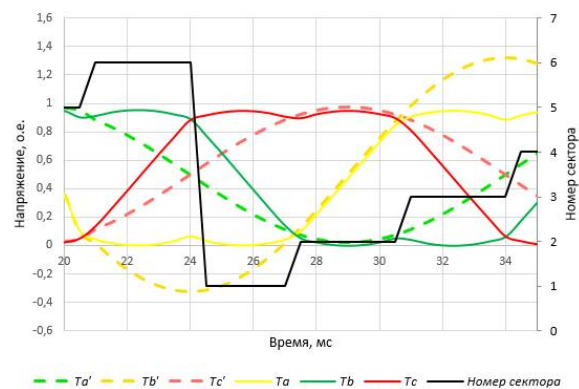


Рис. 5. Соотношение выходных сигналов T_a , T_b , T_c и сигналов, которых их формируют T_a' , T_b' , T_c' на протяжении работы 2-го сектора

Здесь T_x' это сигналы формирующие выходные сигналы T_x . Из рисунка 5 видно, как формируются выходные сигналы в зависимости от сектора на примере второго. Аналогично делается для других секторов на основании таблиц 1 и 2.

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЕКТОРНОЙ ШИМ НА БАЗЕ МИКРОПРОЦЕССОРА TMS320F28335

Для экспериментального анализа будем использовать скалярную разомкнутую систему управления электроприводом на базе микропроцессора TMS320F28335, выполненную в среде программирования Code Composer Studio. Единственной особенностью будет являться то, что для формирования сигналов управления ключами инвертора будем использовать векторный метод ШИМ.

Упрощенная функциональная схема системы скалярного управления показана на Рис. 6.

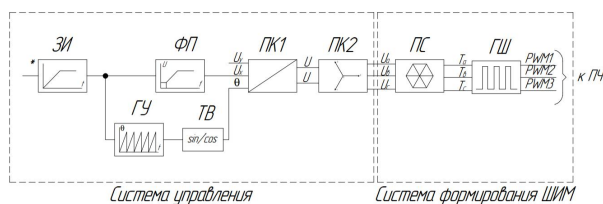


Рис. 6. Функциональная схема скалярной системы управления

Система управления состоит из задатчика интенсивности, функционального преобразователя, генератора угла, тригонометрического вычислителя, двух преобразователей координат, преобразователя сигналов (который формирует непосредственно векторную ШИМ) и генератора импульсов ШИМ. На Рис. 7 показан результат работы программы с отображением переменных T_a и T_b в среде программирования Code Composer Studio.

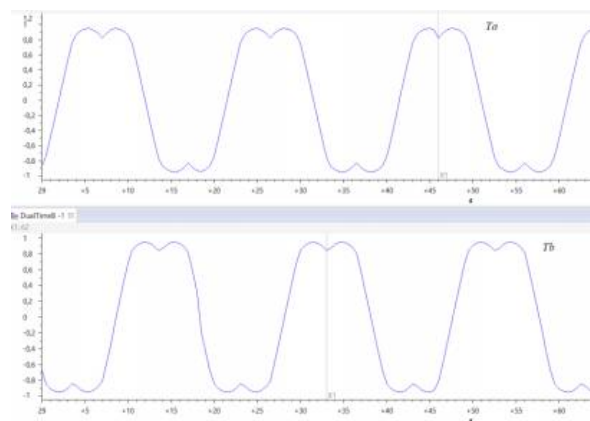


Рис. 7. Сигналы T_a и T_b
(Code Composer Studio)

Сигналы имеют частоту 50 Гц и сдвинуты относительно друг друга на 120° , что говорит о корректности работы программы.

Заключительным этапом верификации составленной системы управления является проверка работы сигналов на осциллографе и непосредственный запуск двигателя. Функциональная схема лабораторного стенда изображена на Рис. 8.

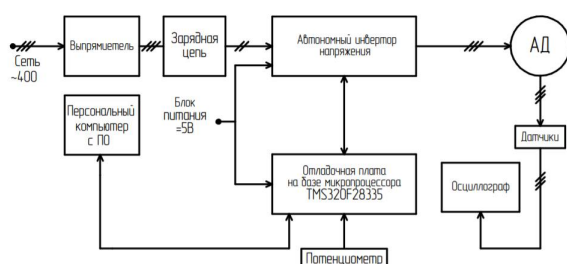


Рис. 8. Функциональная схема лабораторной установки

Плавный пуск можно осуществлять с помощью потенциометра, подключенного к АЦП на отладочной плате. Для точного задания скорости программируется датчик интенсивности, задания для которого подается с кнопок на плате. Также возможен реверс двигателя, заданием на скорость меньше 0.

Чтобы увидеть в какой функции изменяется скажность импульсов ШИМ, необходим фильтр нижних частот (ФНЧ) [4]. Для решения такой задачи подходит ФНЧ 1-го порядка с частотой среза около 206 Гц. Осциллограммы отфильтрованного сигнала представлены на Рис. 9. Отдельно сигнал на выходах ШИМ после фильтрации представлен на Рис. 10.

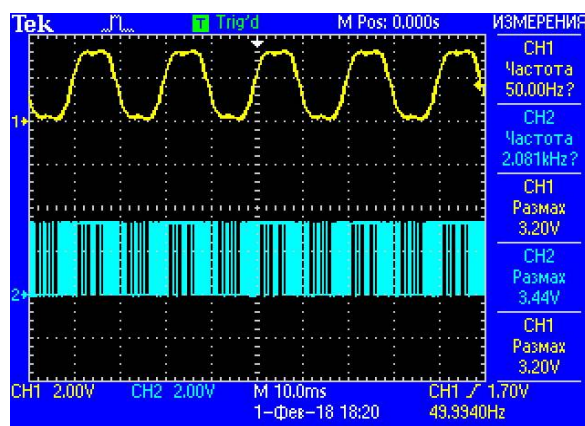


Рис. 9. Отфильтрованный и импульсный сигнал ШИМ

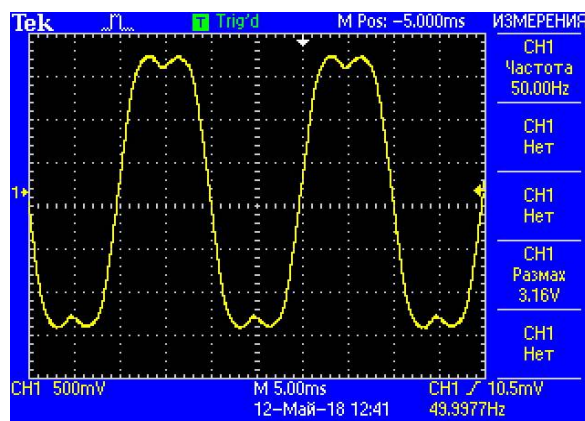


Рис. 10. Отфильтрованный сигнал ШИМ

Из Рис. 9 видно, что сигналы управления ключами инвертора на выходе ШИМ после фильтрации имеют требуемую форму и частоту 50 Гц.

Также для проверки работы системы управления двигателем важны сигналы с датчиков тока, по их характеру можно судить о корректности спроектированной системы. На Рис. 11 показаны сигналы с датчиков тока для трех фаз двигателя при задании на частоту напряжения (и, соответственно, тока) 10 Гц.

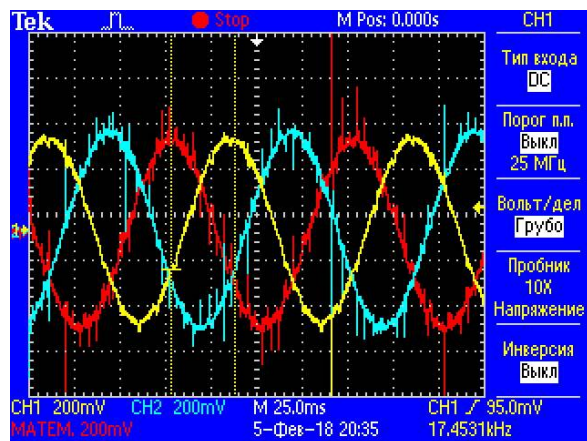


Рис. 11. Сигнал с датчиков тока

Осциллограмма показывает, что система управления электроприводом работает корректно, поскольку соблюдается заданная частота и сдвиг сигналов по фазе, который составляет 120° . Однако существует серьезный недостаток – сигналы с датчиков тока имеют высокочастотные помехи, поэтому их использование для организации обратных связей для решения более сложных систем управления электроприводом недопустимо. Необходима, либо программная, либо аппаратная фильтрация, или использование более качественных датчиков с низким уровнем помех.

На Рис. 12. Показаны фазные токи при реверсе двигателя.

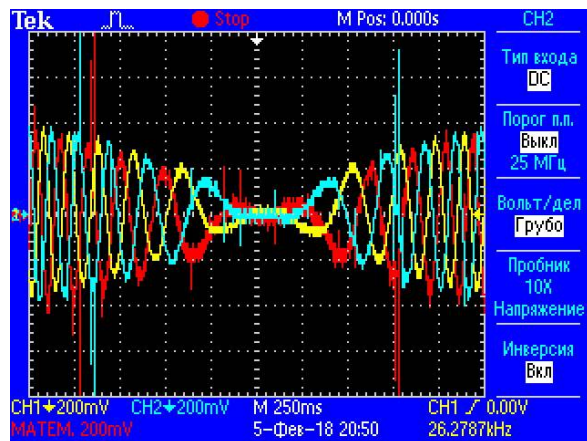


Рис. 12. Сигнал с датчиков фазных токов при реверсе двигателя

Рис.12. показывает, что при реверсе двигателя частота токов статора и их амплитуда постепенно увеличиваются, что говорит о корректности работы программы. Также из осциллограммы реверса можно отметить, что при изменении направления вращения двигателя происходит смена чередования фаз с прямой на обратную.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были представлены теоретические и экспериментальные данные по разработке пространственно-векторной ШИМ, выделены определенные особенности по получению сигналов управления ключами, для более эффективного использования напряжения питания без использования предмодулирующего сигнала. Для микропроцессорного векторного алгоритма ШИМ характерно то, что необходимо сформировать сигнал, в функции которого будет изменяться сигнал ШИМ (T_a , T_b , T_c), тогда как традиционная методика векторной ШИМ ограничивается расчетом времени включения образующих векторов. Также, такая системы была проверена как внутри среды программирования, так и непосредственно на осциллографе и реальном двигателе, что подтвердило работоспособность разработанных алгоритмов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лихошерст В.И. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии с импульсным регулированием: Учебное пособие / Екатеринбург: ГОУ УГТУ-УПИ, 2002. 166.
2. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводом переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты/ Екатеринбург. УрУ РАН, 2000 г. 654 с. ISBN 5-7691-111-9.
3. Texas Instruments Inc. C2000 Systems and Applications. Digital Motor Control Software Library: Target Independent Math Blocks.
4. Texas Instruments Application Report SPRAA88A – September 2008. Using PWM Output as a Digital-to-Analog Converter on a TMS320F280x Digital Signal Controller.